

UNIVERSIDAD: Universidad Nacional de La Plata

COMITÉ ACADÉMICO: Agroalimentario. "Seguridad y calidad de los alimentos "

TÍTULO DEL TRABAJO: **ESTIMACIÓN Y CONTROL DE LOS TIEMPOS DE ESCALDADO DE HONGOS. ESTUDIO DE ÍNDICES DE CALIDAD.**

AUTOR(ES): Alejandro R. Lespinard, Pablo R. Salgado, Sandro M. Goñi y Rodolfo H. Mascheroni

CORREOS ELECTRÓNICOS DE LOS AUTORES: alespinard@cidca.org.ar, psalgado@cidca.org.ar, smgoni@unq.edu.ar, rhmasche@ing.unlp.edu.ar.

PALABRAS CLAVES: Escaldado, Tiempo de procesamiento, Índices de calidad – Branqueamento, Tempo de processamento, Índice de Qualidade

1. INTRODUCCIÓN

Los hongos son productos altamente perecederos y su deterioro comienza inmediatamente después de su cosecha (Kotwaliwale et al., 2006). Reacciones de pardeamiento en hongos disminuyen su vida útil a unos pocos días, siendo la enzima polifenol oxidasa (PFO) la principal responsable de este fenómeno de deterioro. Debido a esto los hongos frescos deben ser inmediatamente procesados para extender su período de aptitud comercial (Devece et al., 1999). La producción de conservas es un de los métodos más utilizados para tal fin, dentro de este proceso de producción, el escaldado constituye una importante operación unitaria. Los principales objetivos del escaldado son: (i) reducir el pardeamiento enzimático por inactivación térmica de la PFO, y (ii) inducir la contracción de tamaño evitando que ocurra durante la esterilización (Biekman et al., 1997). Durante el escaldado se producen también fenómenos de deterioro sobre las propiedades sensoriales, como textura y color, siendo estos los principales atributos de calidad considerados por el consumidor (Kotwaliwale et al., 2006). Por esto resulta de particular importancia estimar el tiempo estrictamente necesario para alcanzar la inactivación enzimática y la contracción de tamaño deseada, a los fines de evitar las pérdidas de calidad nutricional y organoléptica debidas al sobreprocesamiento. En bibliografía se encuentran pocas referencias sobre el modelado de la transferencia de calor y la variación de tamaño de hongos durante el escaldado. Konanayakam y Sastry (1988) describieron la contracción del hongo como tres aparentes reacciones de primer orden, siendo la duración de cada fase dependiente de la temperatura. Por su parte Biekman et al. (1997) mostraron que la velocidad de contracción durante el escaldado es función de la temperatura del baño y la masa del hongo, y que esta actúa en forma sinérgica con el incremento de la velocidad de calentamiento. McArdle y Curwen, (1962) han reportado que la mayor parte de esta contracción (25% promedio) ocurre durante el escaldado, y que la pérdida de peso que ocurre durante el procesamiento térmico (escaldado y esterilización) se encuentra en el orden del 30-40%.

Los objetivos de este estudio fueron: (1) estimar el tiempo de escaldado para lograr la inactivación total de la PFO y alcanzar una contracción óptima del tamaño del hongo (18%), (2) modelar la transferencia de calor a través del hongo y acoplar a este un modelo cinético de variación de índices de calidad a los efectos de optimizar el proceso.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Tratamientos térmicos.

Los hongos (*Agaricus bisporus*) fueron colocados completamente sumergidos en un baño de agua termostatzado (HAAKE F3, Germany). Se diseñaron cinco procesos de escaldado equivalentes (misma contracción del tamaño), a diferentes temperaturas del medio de calentamiento: 50, 60, 70, 80 y 90°C. Los tiempos de proceso fueron estimados, en cada caso, para alcanzar una contracción del 18% en el tamaño (80% de la máxima reducción de

tamaño). Luego de transcurridos los tiempos de proceso estimados, las muestras fueron retiradas del baño y enfriadas en un mezcla agua-hielo durante dos minutos.

2.2. Adquisición de imágenes y determinación de tamaños.

Se empleó un sistema de visión computacional formado por una cámara digital (Professional Series Network IP Camera Model 550710, Intellinet Active Networking) conectada a una PC (AMD Sempron 2200+, 768 MB RAM). La cámara digital fue montada, por medio de un soporte, en forma perpendicular al baño termostatzado (Figura 1).

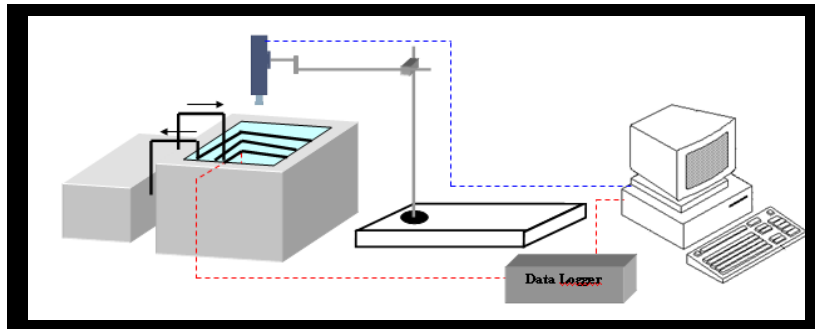


Figura 1. Esquema de la disposición y sistema empleado para la adquisición de imágenes.

Las muestras se colocaron en un soporte de forma vertical u horizontal, para medir la contracción del diámetro y la altura respectivamente. Las imágenes de los hongos fueron obtenidas, durante el escaldado, a intervalos de 30 segundos en el inicio y cada 2 minutos en la etapa final del proceso. Las dimensiones características L y A (ver Fig.2) se calcularon mediante el procesamiento de las imágenes obtenidas con *Image Processing Tolbox*, MATLAB (MathWorks, Nantick, Massachusetts).

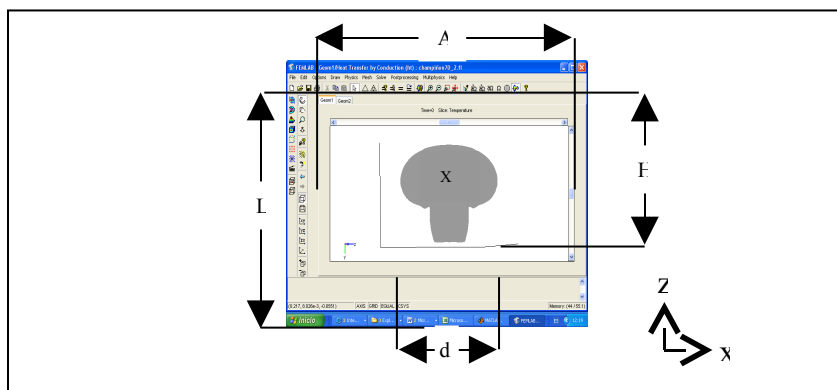


Figura 2. Geometría del hongo mostrando las dimensiones características y la localización (x) del punto de medición experimental de la temperatura.

A su vez también se midieron con calibre todas la dimensiones características (A , L , H y d) de tres muestras, antes y después del escaldado.

2.3. Adquisición de temperaturas

Las temperaturas del baño y del centro térmico del hongo (centro geométrico de la cabeza del hongo) (Fig.2) se midieron utilizando termocuplas tipo T Cobre-Constantan (Cu-CuNi), cada 15 segundos. El registro de las historias térmicas se obtuvo utilizando un adquirente multicanal KEITHLEY modelo AS-TC.

2.4. Modelado de la penetración de calor

Un modelo matemático fue desarrollado para describir la transferencia de calor conductiva a través del vegetal (Ecuación 1) con condiciones de contorno convectivas (Ecuación 2) y considerando una distribución uniforme de temperatura en el producto al inicio de las experiencias (Ecuación 3). El modelo desarrollado fue resuelto por medio del método de elementos finitos (COMSOL, Multiphysics™, version 3.2) con las siguientes propiedades termo físicas constantes: $C_p=3965 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $k=0.35 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Akterian et al. 1995). La densidad fue determinada midiendo experimentalmente la masa del hongo y el volumen del mismo, obteniéndose una densidad media de 618.75 Kg m^{-3} .

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k \nabla T) \quad (1)$$

$$k \nabla T = h (T_\infty - T) \quad (2)$$

$$T(x, y, z, t = 0) = T_0 \quad (3)$$

Los hongos fueron considerados cuerpos de rotación con sección transversal de contorno irregular. El coeficiente de transferencia de calor $h=130 \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ fue obtenido minimizando el residuo entre los valores de temperatura experimentales y el predicho por el modelo. El modelo descrito fue validado comparando las temperaturas simuladas con las obtenidas experimentalmente. Esas comparaciones fueron realizadas por medio del cálculo de las diferencias relativas absolutas medias. Ecuación 4:

$$D_r = \frac{100}{m} \sum_{i=1}^m \left\| \frac{T_s - T_e}{T_e} \right\| (\%) \quad (4)$$

3. Evaluación de índices de calidad

3.1. Valor de cocción

El valor de cocción medio (C_{medio}) y superficial (C_{sup}) fue determinado por medio de las ecuaciones 5 y 6, respectivamente. Se consideró una temperatura de referencia (T_{ref}) de 100°C y un valor z (z_c) de 25°C . El valor de z_c fue tomado sobre la base de un promedio de los valores correspondientes a la cinética de deterioro de componentes químicos (Lau y Tang, 2002).

$$C_{\text{medio}} = \frac{1}{V} \int_0^{t_f} \int_{\Omega} 10^{(T - T_{\text{ref}})/z_c} d\Omega dt \quad (5)$$

$$C_{\text{sup}} = \frac{1}{S} \int_0^{t_f} \int_{\Gamma} 10^{(T - T_{\text{ref}})/z_c} d\Gamma dt \quad (6)$$

Los valores de C-medio y C-superficial fueron calculados, para cada proceso, por integración numérica de las Ecuaciones 5 y 6 respectivamente, utilizando los perfiles simulados tiempo-temperatura para todo el dominio del hongo.

3.2. Actividad enzimática (Polifenol oxidasa)

Para la extracción de la enzima (PFO) se siguió el protocolo descrito por Concellón (2003). Las muestras fueron congeladas con nitrógeno líquido y molidas en un mixer (De Longhi, KG 30, Italy). Tres gramos de la muestra en polvo fueron homogenizados con buffer fosfato (KH_2PO_4 0.1M; Na_2HPO_4 0.1M; Tritón X-100 0.15 v/v; PVPP 30g l⁻¹; pH=6), durante una hora a 4°C. Luego se centrifugó a 11200 xg por 15 minutos a 4°C (Beckman Coulter, Avanti J-25, USA). El sobrenadante fue separado para determinar la actividad enzimática, usando un buffer fosfato con 4-metilcatecol (Sigma, Sigma Chemical Co, USA) como sustrato enzimático (KH_2PO_4 0.1M; Na_2HPO_4 0.1M; 4-metilcatecol 0.012M; pH=6). La reacción se llevó a cabo a 30°C. El color resultante de la oxidación enzimática del catecol fue medido a 410 nm empleando un espectrofotómetro (BECKMAN DU650, USA). Las determinaciones se realizaron por duplicado y la actividad enzimática se expresó como el cambio de absorbancia por gramo de peso fresco ($\Delta\text{DO min}^{-1} \text{g}^{-1}$).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Variación de tamaño.

La secuencia de imágenes tomadas por la cámara para el proceso de escaldado a una temperatura de 70°C es mostrada en la Figura 3. En ésta se puede observar una rápida disminución del tamaño en la etapa inicial, haciéndose más lenta, hasta alcanzar un tamaño constante (D_e), a tiempos largos. Similares patrones se obtuvieron para los demás procesos.

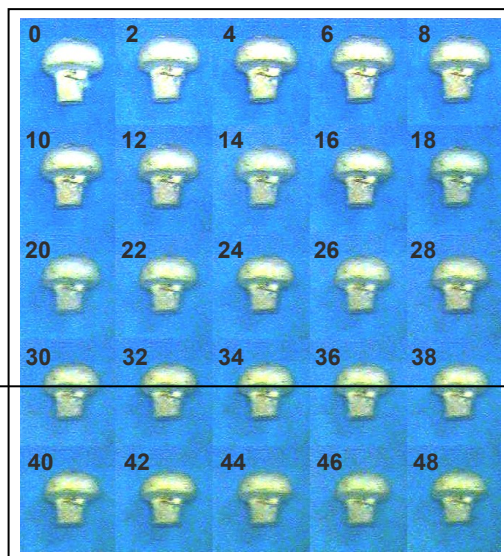


Figura 3. Secuencia de imágenes, cada 2 minutos, mostrando el cambio de tamaño del hongo durante el escaldado a 70 °C.

En la Fig. 4 se muestra la variación temporal del tamaño adimensional de la cabeza del hongo (A). Por su parte, la dimensión longitudinal (L) exhibió una tendencia similar.

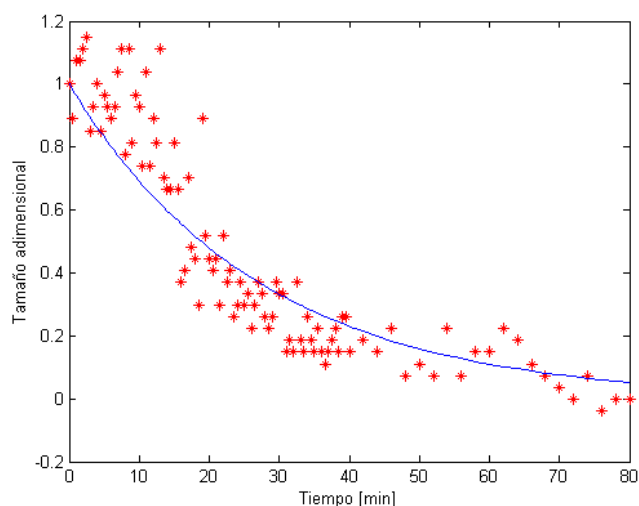


Figura 4. Variación del tamaño adimensional de A con el tiempo de proceso.

La variación del tamaño adimensional fue ajustada mediante un modelo exponencial decreciente (Ecuación 7), donde D_t es la dimensión característica instantánea, es decir, A (m) o L (m), durante el escaldado a un tiempo t (min); D_0 , es la dimensión inicial (antes del escaldado); D_e , la dimensión (de equilibrio) luego de un tiempo prolongado de proceso y K_1 es la constante de velocidad.

$$\frac{D_t - D_e}{D_0 - D_e} = \exp(-K_1 * t) \quad (7)$$

Los valores de las constantes de velocidad (K_1) obtenidas para A y L para un mismo proceso fueron similares, implicando aproximadamente igual grado de contracción radial y longitudinal. Por esto las mismas fueron promediadas obteniéndose así una constante de velocidad media (K_m) para cada proceso, la cual representa la contracción global (Tabla1). Los valores de K_m muestran un aumento con la temperatura del baño, lo que indicaría un aumento de la velocidad de contracción con la temperatura del baño.

T (°C)	K_m (min ⁻¹)	S.D. (min ⁻¹)
50	0,01965	0,0141
60	0,04123	0,0074
70	0,06448	0,0083
80	0,13105	0,0561
90	0,23253	0,0114

Tabla 1. Constantes de velocidad media de contracción para cada proceso.

La dependencia de K_m con la temperatura puede ser representada por la ecuación de Arrhenius:

$$K_m = A_1 * \exp(-E_a / RT) \quad (8)$$

donde A_1 es el factor pre-exponencial (min⁻¹), E_a es la energía de activación (kcal/mol), R es la constante universal de los gases (1,98 cal/mol K) y T la temperatura del baño (K). La energía de activación y el factor pre-exponencial fueron determinados por medio de una

regresión lineal de $\ln k$ vs. $1/T$ (Fig. 5), siendo $-E_a/R$ la pendiente y $\ln A_i$ la ordenada al origen.

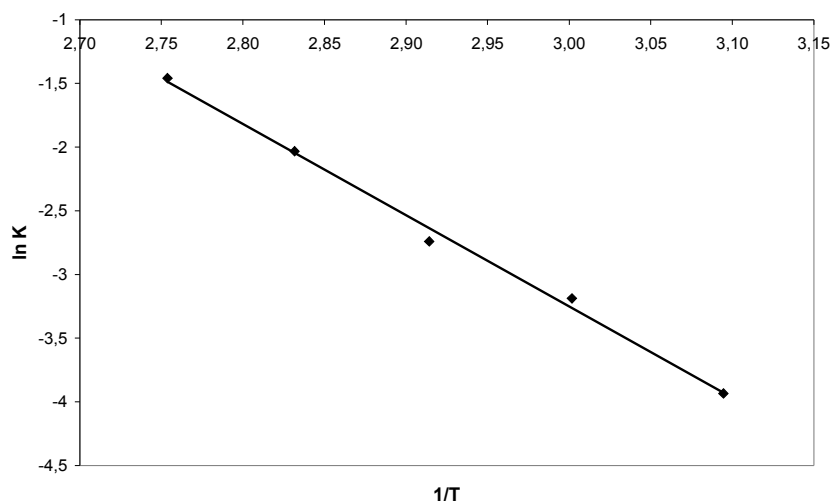


Figura 5. Gráfico de Arrhenius para la contracción del hongo durante el escaldado.

Temperatura (°C)	A (%)	L (%)	H (%)	d (%)
50	22.05	23.16	22.05	15.42
60	22.92	22.56	25.22	10.09
70	21.11	22.53	21.94	7.85
80	24.49	26.70	27.30	7.02
90	22.16	27.24	28.57	10.21

Tabla 2. Porcentaje de reducción de las longitudes características a tiempos largos de proceso para distintas temperaturas del baño.

Del análisis de esta regresión se obtuvieron valores de 14.19 kcal/mol y $1.40 \cdot 10^6 \text{ min}^{-1}$ para los parámetros E_a y A_i , respectivamente. Similares valores fueron encontrados por Konanayakam y Sastry (1988) para la reducción de volumen ($E_a = 16.80 \text{ kcal/mol}$ y $A_i = 4 \cdot 10^7 \text{ min}$). En la Tabla 2 se presentan las disminuciones relativas porcentuales que alcanzan las distintas dimensiones características a tiempos de proceso largos, cuando éstas alcanzan su valor de equilibrio (D_e). Estos valores concuerdan con los reportados por McArdle y Curwen (1962), quienes encontraron una reducción media de 25%. En dicha tabla se puede observar que el hongo se contrae longitudinalmente (L) aproximadamente en igual grado que radialmente (A). Por otra parte el diámetro del tallo (d) experimenta menor variación que las restantes dimensiones. Esta diferencia de contracciones, entre la cabeza y el tallo del hongo, puede explicarse considerando que la primera presenta cavidades que ocluyen aire, pudiendo éste ser desplazado por el agua durante el escaldado, mientras que el tallo presenta una estructura más compacta.

En la Figura 6 se muestra la variación de la dimensión característica A simulada por medio de los parámetros obtenidos del modelo de regresión (Tabla 2), para las distintas temperaturas del baño.

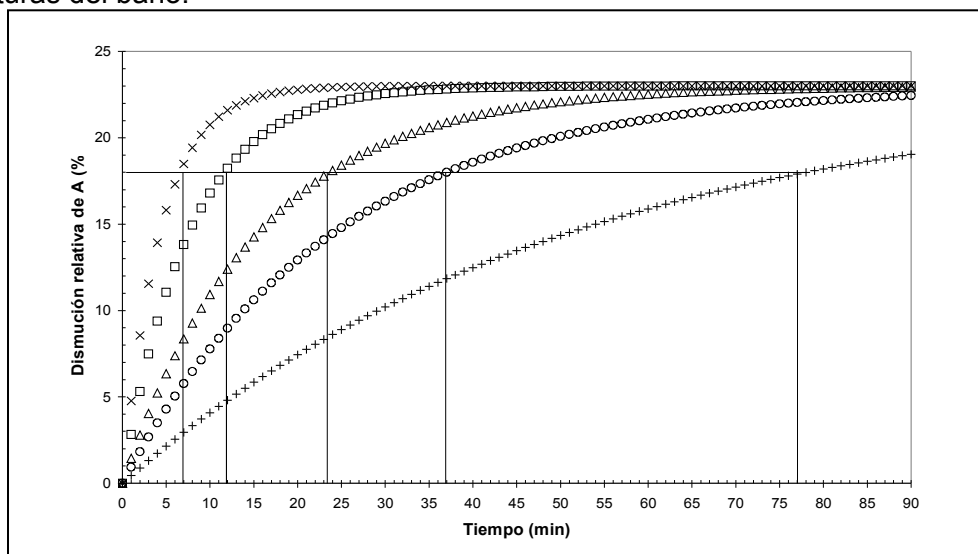


Figura 6. Variación simulada de la disminución relativa porcentual de A y estimación del tiempo de proceso a diferentes temperaturas de escaldado: (x) 90 °C, (□) 80 °C, (Δ) 70 °C, (○) 60 °C, (+) 50 °C

De la observación de la misma se consideró adecuado, a los efectos de determinar los tiempos de escaldado, tomar como parámetro de finalización del proceso una contracción del 18%, ya que contracciones mayores a este valor tornan impráctico (tiempos demasiado largos) el proceso para bajas temperaturas del baño. De esta manera se obtuvieron para las temperaturas del medio de calentamiento de 50, 60, 70, 80 y 90 °C tiempos de 77.00, 37.00, 23.25, 12.00 y 6.75 minutos, respectivamente.

4.2. Simulación de la distribución de temperaturas.

En la Figura 7 se muestra a modo de ejemplo un gráfico 3D del hongo, presentando la distribución de la temperatura, luego de 6.75 min de escaldado a 90 °C. En ésta se comprueba que el punto más frío del hongo se encuentra en el centro geométrico de la cabeza del mismo. Por otra parte el tallo es la región que alcanza mayores temperaturas.

Como se puede observar en la Figura 8 las temperaturas simuladas para el centro térmico mostraron un mayor retardo que las experimentales, este fenómeno puede deberse a la gran diferencia de conductividad térmica (k) y calor específico (c_p) entre la termocupla y el hongo (Akterian et al., 1995). Por este motivo se asumió que la temperatura adquirida experimentalmente se corresponde con la temperatura media del hongo, calculada utilizando los perfiles térmicos obtenidos por simulación, encontrándose así diferencias absolutas medias relativas inferiores al 8% en todos los casos.

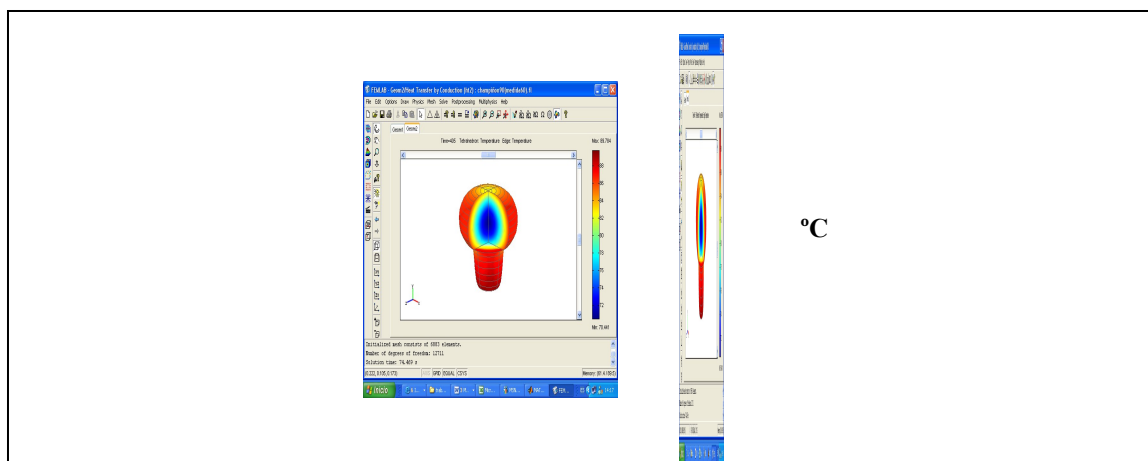


Figura 7. Distribución de temperaturas luego de 6.75 min de iniciado el escaldado a 90 °C.

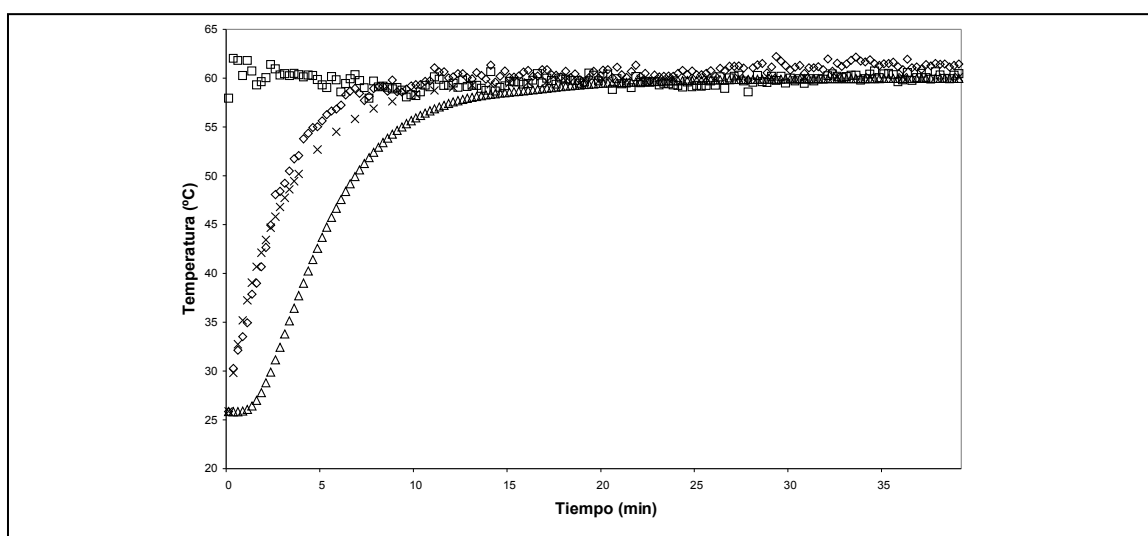


Figura 8. Evolución de la temperatura del hongo durante el escaldo a 60 °C. □ baño termos-tatizado, ◇ experimental en el centro térmico, Δ simulada centro térmico, x simulada media.

4.3. Valor de cocción

Los valores simulados de cocción medio y superficial presentaron entre ellos la misma tendencia, con un valor máximo en el proceso de temperatura intermedia (70°C) (Tabla 3). A su vez la diferencia entre ambos parámetros para un mismo proceso aumenta con la temperatura.

Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	C-value medio (min)	C- value superficial (min)
50	77.00	0.75	0.76
60	37.00	0.79	0.85
70	23.25	1.08	1.23
80	12.00	0.89	1.24
90	6.75	0.56	1.11

Tabla 3. Valores de cocción medio y superficial para los distintos procesos.

4.4. Actividad de la Polifenoloxidasas.

Los hongos sin procesamiento térmico presentaron una actividad enzimática de 0.0766 $\Delta\text{DO min}^{-1} \text{ g}^{-1}$. En los hongos escaldados a temperaturas de 60°C o mayores, se encontró

inactivación total de la misma; pero en el tratamiento térmico a 50°C la enzima fue parcialmente inactivada ($0.0186 \Delta\text{DO min}^{-1} \text{ g}^{-1}$). Esto concuerda con lo descrito por McCord et al. (1983), quienes reportan que la PFO se encuentra totalmente activa a temperaturas menores a 45°C, mientras que a una temperatura de escaldado de 50°C es necesario un tiempo mayor a 35.83 minutos para disminuir su actividad enzimática en un 50%.

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló una cinética de cambio del tamaño del hongo, que permite determinar los tiempos de escaldado para alcanzar una determinada reducción de tamaño. El modelo empleado para describir la transferencia de calor predijo satisfactoriamente la evolución térmica del hongo, permitiendo a su vez calcular índices de calidad cinéticos como el valor de cocción. A una temperatura igual o mayor a 60°C la contracción del tamaño del hongo es el factor limitante (proceso más lento que la inactivación de la PPO) para estimar el tiempo de escaldado, mientras que a temperaturas menores es la inactivación de la enzima PPO. De los cinco procesos de escaldado diseñados el de temperatura del baño a 90°C resultó ser el de menores pérdidas de calidad y tiempo de proceso.

6. REFERENCIAS

- Akterian, S. G. (1995). Numerical simulation of unsteady heat transfer in canned mushrooms in brine during sterilization processes. *Journal of Food Engineering* 25 45-53.
- Biekman, E. S. A., Kroese-Hoedeman, H. I. & Schijvens, E. P. H. M (1995). Loss of Solutes during blanching of mushrooms (*Agaricus bisporus*) as a result of shrinkage and extraction. *Journal of Food Engineering* 28 139-152.
- Biekman, E. S. A., van Remmen, H. H. J., Kroese-Hoedeman, H. I., Oginkf, J. J. M. & Schijvens, E. P. H. M. (1997). Effect of shrinkage on the temperature increase in evacuated mushrooms (*Agaricus bisporus*) during blanching. *Journal of Food Engineering* 33 87-09.
- Devece, C., Rodríguez-López, J. N., Fenoll, J. T., Catalá, J. M., De los Reyes, E. & García-Cánovas, F. (1999) Enzyme inactivation analysis for industrial blanching applications: comparison of microwave, conventional, and combination heat treatments on mushroom polyphenoloxidase activity. *J. Agric. Food Chem*, 47 4506-4511.
- Concellón, A. (2003). Daño por frío en frutos no-climatéricos. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata.
- Konanayakam, M. & Sastry, S.K. (1988). Kinetics of shrinkage of mushroom during blanching. *Journal of Food Science*, 53, 5 1406- 1411.
- Kotwaliwale, N., Bakane, P. & Verma, A. (2007). Changes in textural and optical properties of oyster mushroom during hot air drying. *Journal of Food Engineering* 78 1207-1211.
- Lau, M.H., Tang, J. (2002). Pasteurization of pickled asparagus using 915 MHz microwaves. *Journal of Food Engineering* 51 283-290.
- Matser, A. M., Knott, E. R., Teunissen, P. G. M., Bartels, P. V. (2000). Effects of high isostatic pressure on mushrooms. *Journal of Food Engineering* 45 11-16.
- McArdle, F.J. & Curwen, D. (1962). Some factors influencing shrinkage of canned mushrooms. *Mushroom Sci.* 5:547.
- McCord, J.D. & Kilara, A. (1983). Control of enzymatic Browning in processed mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Journal of Food Science* 48 1479 -1483.
- Sastry, S. K., Beelman, R. B. & Speroni, J. (1985). A three-dimensional finite element model for thermally induced changes in foods: application to degradation of agaritine in canned mushrooms. *Journal of Food Science* 50 1293-1299.